第 38 卷第 3 期　2018 年 2 月
生　态　学　报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.38,No.3　Feb.,2018

DOI: 10.5846/stxb201611022233
姚远,陈曦,钱静.城市地表热环境研究进展.生态学报,2018,38(3):1134-1147.
Yao Y, Chen X, Qian J.Research progress on the thermal environment of the urban surfaces.Acta Ecologica Sinica,2018,38(3):1134-1147.

# 城市地表热环境研究进展

姚　远[1,2,3],陈　曦[2],钱　静[1,2,*]
1 中国科学院深圳先进技术研究院, 深圳　518055
2 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室,乌鲁木齐　830011
3 中国科学院大学,北京　100049

**摘要**:近 50 年来,以中国为代表的发展中国家快速城市化过程所引起的生态环境问题直接导致了城市地表热环境的剧烈变化。当前,采用定量化的研究方法开展城市地表热环境研究已成为国内外城市生态环境与气候领域的研究热点之一。因此,厘清城市地表热环境的研究进展对于今后更好地开展城市空间热环境定量评价研究以及进一步促进城市可持续发展具有重要的现实意义。在对城市空间热环境和城市热岛等相关概念、主要研究方法和数据获取方式进行简要叙述的基础上,着重从城市地表热环境的时空特征及其变化、驱动力和驱动机制、城市地表辐射与能量平衡、城市地表热岛与城市大气热岛的关系及其演变规律、城市绿地和水体对城市热岛效应的缓解、城市地表热岛的尺度转换等 6 个主要方面对当前国内外已开展的城市地表热环境研究进行了归纳总结,并就当前研究过程中存在的问题以及未来的研究重点进行了探讨,以期为今后更好地开展城市地表热环境定量化研究提供参考。

**关键词**:城市地表热环境;定量遥感;时空特征;地表辐射与能量平衡

## Research progress on the thermal environment of the urban surfaces

YAO Yuan[1,2,3], CHEN Xi[2], QIAN Jing[1,2,*]
1 *Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen* 518055, *China*
2 *State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi* 830011, *China*
3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

**Abstract**: The dramatic changes in the thermal environment of urban surfaces could not only affect human health and well-being in terms of increased mortality and morbidity, but also alter components of the eco-environment, such as air and water quality, biodiversity, and net primary production. Over the last 50 years, within the context of rapid urbanization and human population density increases, ever-expanding impervious surfaces have triggered various environmental challenges in developing countries like China. Concerns related to environmental degradation, traffic jams, air pollution, and shortages of resources are expected to become more serious in conjunction with dramatic changes in the urban surface thermal environment. In light of this, studies on the urban surface thermal environment using quantitative research methods have become a hot topic for scientists in China, as well as worldwide. Hence, understanding the current progress in studies related to the urban surface thermal environment has importance and practical significance on the quantitative evaluation of the urban thermal environment and the promotion of sustainable urban development. In this paper, we first introduce the concepts of the urban surface thermal environment and urban heat island, main research methods, and data acquisition techniques. Secondly, we review the progress of research on the urban surface thermal environment considering the following aspects: the spatial temporal characteristics of the urban surface thermal environment and its changes, driving forces and

**基金项目**:深圳市基础研究项目(JCYJ20150630114942260,JCYJ20150630114942312)
**收稿日期**:2016-11-02;　**网络出版日期**:2017-10-18
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: jingqian@siat.ac.cn

mechanisms, urban surface radiation and energy balance, the relationship between urban surface heat islands and urban atmospheric heat islands and its evolution, urban greenbelt and water-body alleviation of the urban heat island effect, and scaling transformation of remote sensing temperature products. Finally, the difficulties, shortcomings, and existing bottlenecks in current research are discussed. Future research directions are equally proposed to provide a reference for future researchers interested in quantitative analysis of the urban surface thermal environment.

**Key Words**: urban surface thermal environment; quantitative remote sensing; spatial and temporal characteristics; surface radiation and energy balance

城市空间热环境是指能够影响人体对冷暖的感受程度、健康水平和人类生存发展等与热有关的物理环境[1-2]。具体而言,是以城市下垫面的地表温度和空气温度为核心,以受人类活动影响而改变后的传输大气状况(如空气湿度、风速、大气浑浊度等)、下垫面状况(土地利用覆盖类型、热容、发射率、反照率等)和太阳辐射为组成部分的一个可以影响人类及其活动的物理环境系统[3-4]。城市空间热环境的演变过程与人类社会、经济活动有着密切的关系[5]。城市化进程加快,沥青、金属、水泥等不透水表面大量替代原有自然地表[6-7]以及人口数量激增均造成了城市整体热排放水平的日益增加[8-9]。因而,城市热环境状况的良好与否是当前衡量城市生态环境状况的重要指标之一,不仅直接关系到城市人居环境质量和居民健康状况,同时还对城市能源和水资源消耗、生态系统过程演变、生物物候以及城市经济可持续发展有着深远的影响[10-13]。

目前,城市空间热环境的日益恶化已成为全球现代化城市气候变化最为显著的特征之一[14],并对城市空气质量改善、雾霾治理和植物健康生长带来了极大的负面影响[15]。Poumadere 等[16]甚至认为城市空间热环境恶化已成为全球后工业时代导致人类死亡数量最大的灾害。Johnson 等[17]和薛志成等[18]研究表明,城市热岛中心区域居民的失眠率、患呼吸道和心血管疾病的概率甚至死亡率均远高于非热岛区的居民。美国疾病预报控制中心(Centers for Disease Centers of Control and Prevention, CDC)估计,在 1979 年之后的 10 年时间里,美国大约有 7421 人因城市环境过热而死亡。1980 年 7 月,美国接连遭受热浪袭击,美国的 Kansas 和 St. Louis 两座城市的 CBD 商业核心区受热岛效应影响死亡率分别上升了 64% 和 57%,而城市郊区等其他未受到热岛效应影响的区域,死亡率上升不到 10%[19]。美国政府每年用于缓解城市热岛效应的能源成本支出已高达约 100 亿美元,如何准确监测城市区域的热环境变化,使其能够可持续发展是全世界各国政府、企事业单位、国际组织和大学研究机构目前研究的一个热点问题[20-23]。我国于 2006 年 2 月,由国务院[24]颁布了《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》,国家住房和城乡建设部[25-26]分别于 2013 年 9 月和 2015 年 11 月发布了《城市居住区热环境设计标准(JGJ286-2013)》和《城市生态建设环境绩效评估导则(试行)》将城市热环境的质量纳入到了建设项目考核评价指标体系,表明我国已将城市热环境问题作为今后城市整体建设和发展的重要研究项点,并希望通过不断完善和规范设计标准,确保今后我国城市生态环境的可持续发展。

## 1 城市空间热环境的相关概念

### 1.1 城市空间热环境和城市热岛概念的区别

城市热岛效应是指快速城市化和工业化过程中导致城市大气温度和地表温度高于周边郊区或乡村等非城市环境的一种温度差异性现象[27-28](图 1[29])。而城市空间热环境则是近年来气象和环境研究领域的专家学者在城市热岛概念的基础上进行扩展延伸后提出的概念,两者既有区别,又有联系。二者的共同点在于表征因子均为地表温度和大气温度,区别在于前者更加强调城市市区与郊区之间温度的差异性,而后者的衡量指标则是与温度的高低程度、建筑容积率、建筑密度、水体和绿地分布等多种因素相关[30-31]。因此,城市热岛效应在某种程度上是城市空间热环境的一种集中性反映和体现。由于当前在全球城市区域尺度范围内开展的城市空间热环境及其气候变化和环境整治研究大多是以热岛效应为主要内容,所以本文对城市空间热环境和城市热岛的研究进展均有提及。

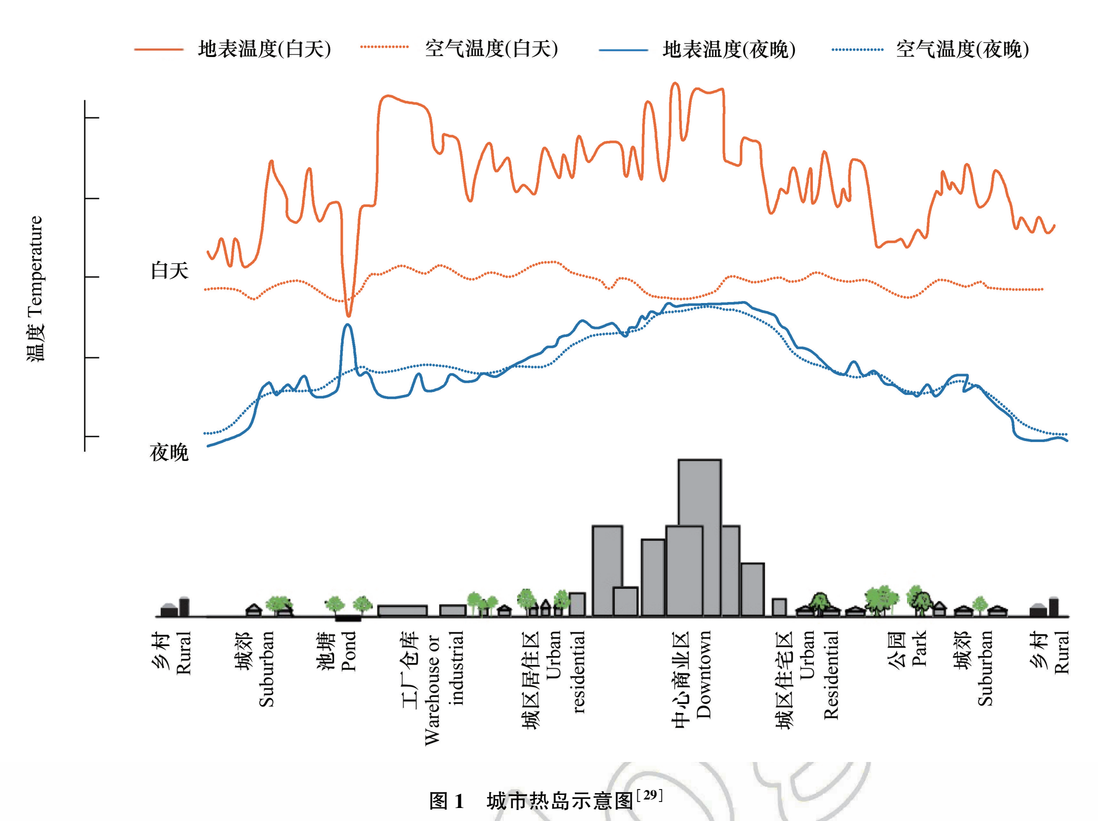



图 1　城市热岛示意图[29]

Fig.1　A sketch map of urban heat island

## 1.2　城市空间热环境的研究范围与方法

从数据源上来看,用于城市空间热环境研究的数据来源主要分为地表温度数据(遥感数据)和大气温度数据(气象数据)。由于城市大气的分层结构不同,城市热环境的研究范围主要分为城市地表层、城市冠层和城市边界层[32](表 1)。其中,城市冠层和城市边界层上的热岛效应属于城市大气热岛的研究范畴,分别称之为城市冠层热岛和城市边界层热岛。城市边界层和城市冠层的热环境和热岛效应主要应用气象数据进行研究,主要方法包括地面观测和数值模拟(表 2)。

表 1　城市空间热环境的研究范围

Table 1　The research scope of urban space thermal environment

| 分类 Classification | | 研究范围 Research scope | 研究数据源 Research data | 主要研究方法 Research methods |
|---|---|---|---|---|
| 城市大气热岛 Atmospheric urban heat island | 城市冠层热岛 | 介于城市边界层和地表层之间,产生于城市地表到平均建筑高度的范围内 | 大气温度数据 | 地面观测 |
| | 城市边界层热岛 | 产生于城市冠层之上,并受到城市下垫面影响 | | 数值模拟 |
| 城市地表热岛 Surface urban heat island | 城市地表层热岛 | 不是实际意义上的一个平面层,而是根据热红外遥感测量的地表温度所表示的热岛,包含从地下到地上三维的地表温度,观测结果并不涉及实际存在的垂直高度问题 | 地表温度数据 | 遥感监测 |

而近年来建筑群热时间常数模型、计算流体力学技术以及灰色系统理论等方法的引入也为城市热环境的模拟研究提供了新的思路和视角[40-45]。

相对于城市冠层和边界层而言,城市地表层温度与人体的健康和冷暖感受密切相关,既是描述城市空间热环境状况、解释城市空间热环境形成的重要参数,也是当前城市空间热环境研究的核心内容之一,并属于城市地表热岛的研究范畴[46]。传统的通过地面气象观测设备获取的高空或地表温湿压数据由于受到尺度效应

表 2　城市空间热环境主要研究方法

Table 2　Main research methods of urban space thermal environment

| 主要方法 Main methods | 监测手段 Monitoring means | 具体内容 Concrete content | 优点 Advantage | 缺点 Disadvantage |
|---|---|---|---|---|
| 地面观测 Surface observation | 气象站 | 包含国家基准气候站、国家基本气象站、国家一般气象站以及自动气象站等 | 数据观测时间尺度较长,数据种类和完整度高 | 站点间隔较大有限,空间分辨率不高;仪器的误差、测点的变动、测站选取不同对研究结果影响较大 |
| | 定点观测 | 包含水平观测和垂直观测。其中,垂直观测包括观测铁塔、探空气球等 | 精度高、仪器可根据研究需要进行布置 | 受人力和物力条件的制约,难以获取较大区域尺度的数据;受周边环境影响较大,单点数据代表性差 |
| | 移动样带 | 包括有轨电车、汽车和自行车等携带气象数据传感器和数据采集器的移动交通工具 | 利用有限的仪器可获取多点观测数据,利于城市断面热环境分析 | 获取数据的时间不同步,不利于比较分析;受交通工具、周边环境影响较大;仪器灵敏度较低 |
| 数值模拟 Numerical simulation | 数学模型一维模型<br>数学模型二维模型 | 包含 Myurp[33] 创立的最早的一维地表平衡模型、Oke 等[34] 应用的一维 SHIM 模型 Vukovich[35] 应用的二维线性化模型、基于美国大气研究中心(NCAR)中尺度模式 MM4 改造的二维数值模式[36] 等 | 将整个城市视为自然地表一样的均一下垫面结构,不考虑建筑的高程,方法简单,容易操作 | 由于城市热环境的影响因素多,现实情况的复杂程度高,因而对于模型的通用性影响较大;需要大量实测气象数据,模拟实验方案复杂,实验条件不易控制,重复性不高;输入参数不确定;不同城市的环境差异较大,实验室条件下模拟城市环境的代表性较低 |
| | 数学模型三维模型 | 包含在中尺度区域上耦合了城市冠层、边界层、单层城市冠层模型(UCM)、多层城市冠层模型(BEP);以 RBLM、MM5 为代表的非静力平衡的区域边界模型和 WRF、RAMS 等为代表的三维中尺度模式;中尺度传输和流动模型(METRAS);LUMPS 和 TEB 等区域城市热环境研究的参数化方案等,以及南京大学和北京大学自主研发的边界层模式 | 实验所需人力和物力成本较其他方法较低;以理论分析为主,现场观测次数较少;描述物理过程的周期性连贯;从理论上揭示城市地表能量交换过程及机理 | |
| | 实验室模拟 | 包括 Summers[37] 建立的理论城市热岛模型、Stathopoulou 等[38] 和 Streuthker[39] 建立的基于人工神经网络模型和高斯模型等 | | |
| 遥感监测 Remote sensing monitoring | 各种平台的遥感传感器监测数据 | 包括航空遥感数据、航天(卫星)遥感数据和地面数据(手持热红外成像仪、辐射计、测温仪、近地面红外相机等) | 航空遥感数据的空间分辨率高;航天遥感数据的时间同步性好、覆盖范围广、成本低;手持热红外监测设备的精度高,数值能够真实反映低温 | 航空遥感数据监测尺度小,大面积观测费用昂贵;航天遥感数据监测尺度大,但不能够满足城市精细尺度(街区尺度和建筑尺度)的监测需要;手持监测设备具有方向性,监测结果易随观测角度的方向和大小而变化,并包含环境辐射的影响,不适合连续观测,时间同步性差且空间局限性大 |

制约,难以实现数据的面状覆盖,因而需要将点尺度数据扩展到面上,而在扩展的过程中数据的真实性和转换精度均会受到一定影响,这对于当前开展城市区域尺度范围的地表热环境研究带来了困难。而星载遥感传感

器可以直接获取城市地表、地物的热辐射信息并具有数据获取周期短、覆盖范围广、获取成本低、能够快速准确地监测城市地表下垫面温度特征等优点,目前已成为国内外专家学者开展城市热环境变化趋势及动态评价研究的主要技术手段[47-48]。通过卫星热红外遥感数据反演并应用于城市地表热环境研究的温度可以分为经过大气校正的地表温度和未经过大气校正的星上亮温。当研究区域的水汽状况基本一致时,可以忽略大气影响而用亮温进行研究。但由于地表热辐射在传导过程中受到辐射面和大气的影响,导致星载传感器接收到的热辐射强度与地表热辐射强度差异较大,因而使用亮温进行研究的结果往往与地表真实温度之间存在一定的误差。而经过大气校正后反演得到的地表温度由于基本考虑了大气和辐射面影响,其反演结果往往更接近于真实的地表温度[49]。根据不同热红外遥感数据的特点,国内外专家学者提出了许多反演温度的算法,归纳起来大致可以分为 3 类:单通道算法、多通道算法和劈窗算法。单通道算法又可以细分为大气校正法[50]、Jiménez-Muñoz 单通道算法[51]和覃志豪单窗算法[52],而多通道算法又可以细分为灰体发射率法[53]、昼夜法[54]和温度发射率分离法[55],劈窗算法又称分裂窗算法,主要包括基于 NOAA-AVHRR 数据[56]、TERRA-MODIS 数据[57]、Landsat-TIRS 数据[58]和 ASTER 数据[59]的劈窗算法。有大量学者对上述算法的优缺点和利弊性进行了分析,普遍认为目前反演地表温度算法较为成熟、应用性和反演精度最好的是劈窗算法[60]。

综上所述,当前认真梳理城市地表热环境的研究进展对于今后开展城市空间热环境定量评价研究以及促进城市可持续发展具有重要的现实意义。近年来,国内外已发表了一些关于城市热岛效应研究的综述性文章,但由于城市热岛的研究范围广,研究的尺度、空间层次和监测方法复杂多样,因而很难在一篇综述性文章中进行全面细致的总结,大多只能简要地对监测手段进行概括[61-62],或是从景观尺度对已开展的热岛效应研究进行归纳[63-64]。而从城市地表热环境研究角度出发,对当前国内外研究历程、现状、方向进行总结的文章目前尚未见文献报道。本文拟通过系统地总结城市地表热环境的研究进展,以期为今后的城市热环境研究提供一些新思路和参考。

## 2 城市地表热环境研究的主要方面

学术界公认的关于城市热岛现象最早记录源自于英国气象学家 Howard 自 1811 年起记录的伦敦市 30 年市区和郊区的气温变化[65]。此后一个多世纪以来,热岛研究采用的均是大气温度数据,一方面体现了气象数据在时间尺度上所具有的连续性优势,另一方面也暴露出气象数据存在以离散的点数据或线性数据代替面状数据、尺度转换精度不高、大型城市平面布局和内部结构特征分析困难等问题。直到 1972 年,Rao[66]首次提出应用遥感数据开展城市热岛效应研究,标志着城市热环境研究从城市冠层和边界层进入到了城市地表层的新阶段。近年来,随着机载遥感和卫星遥感技术的发展,特别是由我国研发的环境与灾害监测预报小卫星(HJ-1B)和中巴资源卫星的发射成功,使得应用于城市地表热环境研究的遥感数据源在空间分辨率和时间分辨率的选择方面得到了极大丰富(表 3),因而成为国内外专家学者开展城市热环境研究工作的主要手段。总体而言,当前开展城市地表热环境遥感研究主要包括以下几个方面。

### 2.1 城市地表热环境时空特征及其变化研究

开展城市地表热环境时空变化研究的目的在于分析城市热环境在不同时间范围内二维或三维空间上的分布状况、强度变化过程及其演变规律。其中研究时间范围包括年际、季节、日和昼夜等。如葛荣凤等[67]利用 1991—2011 年期间的 8 期 TM 遥感影像数据,结合 Moran′s *I* 全局自相关和重心模型等方法,分析了北京市六环范围内的城市热岛效应演变规律和时空变化特征。Sobrino 等[68]利用 SensyTech 公司生产的机载 AHS 高光谱感器(含热红外 10 个波段)获取了西班牙首都马德里市不同时间段、不同分辨率的热红外数据,结合地面实测空气温度和地表温度数据,探讨了时间分辨率和空间分辨率对城市街区尺度地表热环境的影响,研究表明在街区尺度下,用于地表热环境研究的遥感数据其空间分辨率不能低于 50m,否则会难以精确区分城市内部区域,并且最佳观测时间为日出之前。Dousset 等[69]和乔治等[70]分别利用 NOAA AVHRR 和 MODIS 遥感影像数据对美国洛杉矶、法国巴黎和北京市的地表热环境昼夜变化进行了分析。Zhou 等[71]和 Zakšek 等[72]

则分别应用 FY-2C、MSG、MODIS 等卫星数据,采用昼夜温度循环遗传算法和移动窗口分析等方法对北京市和欧洲中心地区城市日变化周期内的地表热环境进行了研究。此外,国产的 HJ-1B 卫星热红外数据由于拥有适宜的空间分辨率和较高的时间分辨率,因而被越来越多的研究人员用于城市地表热环境研究当中,如 Yang 等[73]以 HJ-1B 数据为基础数据源,利用不同算法反演了北京市地表热岛并与同期的 TM 和 MODIS 数据进行了比较,结果表明 HJ-1B 数据的反演结果与 MODIS 和 TM 数据均具有良好的相关性,且单窗算法的反演精度较高。刘帅等[74]应用 HJ-1B 数据建立了一种基于 2.5 维高斯表面模型的城市热岛监测模型,并应用这种模型定量描述了北京城市热环境在不同季节的变化。

**表 3 城市地表热环境遥感研究的主要数据源**

**Table 3 The main remote sensing data of urban surface thermal environment research**

| 空间分辨率等级<br>The level of spatial resolution | 平台/传感器<br>Satellite/Sensor | 空间分辨率<br>Spatial resolution | 时间分辨率<br>Temporal resolution | 波段<br>Band | 光谱范围<br>Spectral range | 卫星发射时间<br>Satellite lunch time |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 高空间分辨率<br>High spatial resolution | 机载/AHS | IFOV:2.5mard | 自定义 | — | — | — |
| | 机载/OMIS | IFOV:3mard | | | | |
| | 机载/TVR | IFOV:1.8mard | | | | |
| | 机载/ATLAS | 5—10m | | | | |
| 中空间分辨率<br>Medium spatial resolution | Landsat/TM | 120m | 16d | 6 | 10.4—12.5 | 1984 |
| | Landsat/ETM+ | 60m | 16d | 6 | 10.4—12.5 | 1999 |
| | Landsat/TIRS | 100m | 16d | 10<br>11 | 10.6—11.19<br>11.5—12.51 | 2013 |
| | Terra/ASTER | 90m | 16d | 10<br>11<br>12<br>13<br>14 | 8.215—8.475<br>8.475—8.825<br>8.935—9.275<br>10.25—10.95<br>10.95—11.65 | 1999 |
| | CEBRS-02/IRMSS | 156m | 26d | 9 | 10.4—12.5 | 2007 |
| | HJ-1B/IRS | 300m | 4d | 4 | 10.2—12.5 | 2008 |
| | FY3/MERSI | 250m | 5.5d | 5 | 11.25 | 2008 |
| 低空间分辨率<br>Low spatial resolution | Aqura/MODIS | 1000m | 0.5d | 31 | 10.78—11.28 | 2002 |
| | Terra/MODIS | 1000m | 0.5d | 32 | 11.77—12.27 | 2000 |
| | NOAA/AVHRR | 1100m | 0.5d | 4 | 10.5—11.3 | 1979 |
| | MetOp/AVHRR | 1100m | 0.5d | 5 | 11.5—12.5 | 2006 |
| | FY-2c/SVISSER | 5000m | 1h | IR1<br>IR2 | 10.3—11.3<br>11.5—12.5 | 2004 |
| | GOES/GOES | 4000m | 最短间隔 15 分钟 | 4<br>5 | 10.2—11.2<br>11.5—12.5 | 1974 |
| | FY3/VIRR | 1100m | 5.5d | 4<br>5 | 10.3—11.3<br>11.5—12.5 | 2008 |

AHS: 机载高光谱扫描仪, Airborne hyperspectral scanner; OMIS: 实用模块化成像光谱仪, Operative modular imaging spectrometer; TVR:热成像辐射计, Thermal video radiometer; ATLAS: 高级热环境和土地应用传感器, Advanced thermal and land applications sensor

综上,当前已开展的城市地表热环境研究主要集中在城市年际或季节时间尺度上的二维空间格局变化研究,也有少数学者利用较高空间分辨率的遥感数据模拟了城市地表热环境的日际变化或逐时变化[75],但遥感数据源在空间和时间分辨率之间相互矛盾(高空间分辨率遥感数据往往时间分辨率较低,而高时间分辨率的遥感数据空间分辨率不高)给当前在不同尺度上定量化地开展城市地表热环境研究带来了一定的局限。

**2.2 城市地表热环境驱动力和驱动机制研究**

任何地理现象的表象变化均是其内在驱动力的外在体现,因而开展城市热环境的驱动力和驱动机制研究是分析城市热环境时空变化的关键。当前,以土地利用及其覆盖被变化、不透水表面和植被等景观格局变化

为代表的自然驱动力和人口、经济、产业形态以及建筑物的高度、密度和容积率等为代表的社会驱动力是国内外学者公认的影响城市热环境的主要驱动力因素[76-77]。

**2.2.1** 土地利用及其覆盖变化与城市地表热环境的关系

土地覆盖是指土地类型及其包含的人文特征和自然属性的综合体，而土地利用变化必定会引起城市表面土地覆被变化。由于城市区域的土地覆盖多由沥青、水泥、金属等材料构成，湖泊、公园、森林相对较少，因而城市化进程的加快，土地利用方式的改变必定会对城市地表热环境的空间分布以及热岛效应的形成和发展产生广泛而深远的影响[78]。牟雪洁等[79]通过利用 TM 影像数据反演的地表温度结合东莞市土地利用分类，分析了建设用地、水体、耕地、绿地等土地利用类型与城市地表热岛强度的关系，发现建设用地的地表温度要远高于其他用地类型。Lazzarini 等[80]以 MODIS、ASTER 等遥感数据反演的地表温度为基础，发现以阿联酋首都阿布扎比为代表的一些干旱半干旱区城市，由于城市周边为裸土和沙漠，而城市内部为水浇园地，因此在白天市区比郊区的地表温度更低，有时表现为冷岛区域。彭文甫等[81]基于 TM 和 ETM+遥感数据，将成都市土地利用类型分为林地、水田、旱地、城镇用地、工矿与交通用地等 7 类，分别探讨了不同土地覆被类型与城市地表热岛效应之间的关系。

**2.2.2** 不透水表面变化与城市地表热环境的关系

不透水表面是指天然或人为源，通过隔离地表水渗透到土壤，从而改变物质沉淀、洪水径流的流动和污染剖面的任何物质，主要由城市道路、广场、建筑物屋顶和停车场组成[82]。不透水表面由于可以改变城市边界层和地表层的潜热和显热通量，因而成为影响城市地表热环境变化的关键因素。利用遥感数据对其进行定量反演能够加强对城市热环境及生态变化过程的理解[83-84]。当前，不透水表面与地表温度关系的研究主要包含以下两个方面：一是通过比对分析、多元统计分析等方法开展不透水表面与地表热环境的关系研究。例如 Yuan 等[85]利用 TM 和 ETM+遥感影像数据分析了不透水表面与美国明尼苏达州 Twin 城不同季节地表温度之间的关系，结果表明二者在所有季节都具有较高的线性相关，能够很好地解释城市地表的热环境特征变化。杨可明等[86]基于全约束最小二乘法混合像元分解模型和植被-不透水面-土壤模型，利用 TM 遥感影像对北京市海淀区不透水面丰度和地表温度的相关性进行了定量评价，发现二者之间存在明显的正相关。二是对不同尺度条件下的不透水面盖度与城市地表热环境关系进行研究。例如 Xiao 等[87]发现利用 TM 遥感影像数据反演的北京市不透水表面盖度(不透水覆盖面积与区域面积的比值)在不同尺度上均与地表温度的空间分布一致。孟宪磊[88]从多个尺度研究了上海市不透水面盖度与城市热岛的关系，结果表明随着空间幅度的扩大，不透水面与地表温度呈现稳定的正相关，但尺度效应并不十分明显。因此，如何进一步揭示不透水面时空演变与热环境效应之间深层次的关系是今后一项重要研究课题。

**2.2.3** 植被、水体与城市地表热环境的关系

与土地利用和土地覆盖数据相比，植被覆盖度、地表水分状况等生物物理组分数据的连续型更强，因而对地表温度的时空差异具有较好的揭示作用。一方面，植被的生长状况、盖度和类型决定了城市地表反照率和城市水分蒸发蒸腾，从而影响了城市地表的能量分配。自 Gallo 等[89]利用 NOAA AVHRR 数据证明归一化植被指数与美国西雅图市的地表温度存在负相关后，国内外专家学者在不同区域尺度上进行了验证，并不断对植被覆盖度数据进行优化，以期通过与城市地表温度进行优化拟合从而更好地探讨植被覆盖与热岛效应之间的相互作用[90-91]；另一方面，城市的水体状况决定了城市地表的比热特性，因而对城市地表温度时空差异具有较好的揭示作用。特别是随着遥感技术的发展，将归一化湿度指数、归一化水体指数、城市地表湿度等遥感监测指标与景观生态学方法相结合，能够更好地展现城市水体对热岛效应的缓解作用[92-94]。

**2.2.4** 景观格局与城市地表热环境的关系

城市内部景观格局的组成与配置，特别是 3 个景观结构成分：斑块、廊道和基质重复性地镶嵌在一起对于城市地表热环境及其热岛效应有着显著的影响[63]。景观格局与城市地表热岛之间的关系研究主要包括两大类：一是基于不同的景观格局指数分析城市景观变化，探讨其与城市地表热环境的关系。景观格局指数自

O′Neil等[95]提出以来得到了快速发展,指数种类越来越多。Chen 等[96]通过分析地表温度与景观格局指数之间的关系,认为景观格局指数并非数量越多解释效果越好,并提出了 5 个具有较好解释能力的景观格局指数。同时,国内外专家学者还就不同尺度条件下的景观格局指数与地表温度的相互关系和尺度效应进行了研究[97-98]。二是基于空间统计方法对地表参数进行统计,分析不同地表参数如 NDVI、归一化地表建筑指数与地表温度之间的关系[99]。此外,诸如“源汇景观”等新的景观分类法的引入也为城市地表热环境研究带来了新思路[100]。比如李立光等[101]基于 TM 遥感数据结合 GIS 技术,识别了城市地表热岛的源区和汇区,并利用热岛强度指数、源区和汇区面积比例指数和地表温度反演结果对沈阳市热岛效应进行了评价。

### 2.2.5　社会驱动力与城市地表热环境的关系

人类活动强度变化影响着城市地表热量的转换,以人口密度、经济发展状况、产业形态以及建筑物的高度、密度和容积率等为代表的社会驱动力因素是导致城市地表温度升高、城市热岛效应加剧的主要原因之一。Mitchell 等[102]利用 Landsat 和 MODIS 遥感影像反演的地表温度,结合当地社会人口普查数据,运用地统计学等空间统计方法,对影响美国佛罗里达州 Pinellas 地区地表热环境分布的人口因素进行了研究,结果表明在贫困人口较为集中的区域以及某些特定种族或少数民族的聚集区域,城市热岛效应更为显著。张瑜等[103]基于 1995 年—2013 年的 8 期 TM 遥感数据以及西安市建成区的人口、绿化面积、废气排放量、GDP、运输量、工业总产值等 11 项统计数据,采用灰色关联度理论定量研究了热岛效应影响因子的贡献率,结果表明认为人类社会因素对热岛效应带来的负面影响日益加剧。综上,社会统计数据由于在空间尺度和时间尺度上的局限性很难适用于小尺度和高时间分辨率的热环境研究,这对于今后开展城市地表热环境的定量分析带来了一定困难。

### 2.2.6　气象因素、大气污染与城市地表热环境的关系

城市的气象条件包括天气晴朗少云或者无云,静风或者无风,气压场、大气层机构稳定等是形成城市热岛效应的外部原因。气象因素不会直接影响城市地表热环境,而是通过植被[104]、地表反照率[105]、人为热排放[106]来影响地表热环境的变化。特别是城市人为大量排放的粉灰、煤灰和各种污染气体,如 $H_2O$、$CO_2$、$CH_4$、$N_2O$ 等温室气体,形成覆盖在城市上空的“气罩”与“尘罩”,从而加剧了城市热岛效应[107]。

## 2.3　基于遥感数据的城市地表辐射与能量平衡研究

城市下垫面的快速变化影响了地表能量的收支平衡,特别是物质和热量交换过程的改变导致了以城市热岛为代表的气候效应,同时城市热岛效应反作用于地表,影响着地表净辐射在潜热通量、显热通量和地表储量之间的分配。因此,深入开展城市地表辐射平衡研究对于进一步理解城市地表热环境问题有着极为重要的科学意义。针对传统的地表能量过程研究方法仅能获取单点数值、计算结果代表性不强的问题,遥感数据由于可以获得区域城市地表下垫面的特征参数因而在该类研究中间具有较大的优势。目前,基于遥感数据建立的地表能量平衡模型主要方法分为 3 类:一是能量平衡余项法,二是经验统计模型法,三是数值模拟模型法。上述 3 种方法的代表模型及优缺点详见表 4[108]。

## 2.4　城市地表热岛与城市大气热岛的关系及其演变规律研究

城市不同界面所反映出的热岛效应各不相同,特别是城市地表热岛与大气热岛之间是否存在耦合或是替代关系,二者之间的演变规律是否存在异同点以及各自的衡量与评价方法是当前城市地表热环境研究的热点方向之一。特别是应用遥感技术反演的地表温度和传统实测方法获取的空气温度作为衡量城市地表热岛和空气热岛的关键性因素,二者之间也存在着复杂的关系。一般来言,在夏季的白天时段,地表温度通常要略高于空气温度[109]。一方面是由于空气温度的敏感性较低且受地表辐射的影响需要一个时间过程,另一方面则是因为空气水汽含量、云量和风力等其他因素导致地表温度和空气温度产生一定的差异性。Eliasson 等[109]通过对比瑞典哥德堡市 3 年的地表温度和空气温度,发现通过气象站观测获取的温度数据所表征的热岛指标在研究城市街区尺度方面并不具有代表性。Abutaleb 等[110]以 ETM+遥感影像反演的城市地表温度数据和地面实测气象数据为基础数据源,对埃及开罗地区的城市热环境进行了比较研究,发现研究区域内大气热岛和

地表热岛并存,主要分布在人口密度最大的城区,且大气温度与地表温度差在 0.5—3.5℃之间。Mohan 等[111]利用印度首都新德里地区气象观测站点的实测空气温度数据与 MODIS 遥感影像反演的地表温度数据进行了比较。结果表明在夜晚时间段,建筑物密集的商业区二者有很高的相关性,而白天的相关性较低。此外,MODIS 反演的温度数据白天要高于实测数据,而夜晚则低于实测数据。综上,在一般情况下城市地表热岛和大气热岛呈现出较为一致的趋势及相似性,但在极端情况下存在着较大的差别。

**表 4 基于遥感数据的城市地表辐射平衡模型[108]**

**Table 4 The main Urban surface heat flux model based on remote sensing**

| 方法 Method | 含义 Content | 分类 Classification | 代表模型 Model | 优点 Advantage | 缺点 Disadvantage |
|---|---|---|---|---|---|
| 能量平衡余项法 Energy residual methods | 基于忽略水平方向能量输入条件和光合作用耗能的地表能量平衡方程,利用遥感数据将感热通量、净辐射、土壤通量当做能量平衡方程的余项进行估算 | 单层模型 | 大叶模型,如 Pman-Mpnteith 模型 | 较好地应用于高植被覆盖度区域 | 经验性较大;不适用于干旱区和土地覆被类型多的区域 |
| | | 二源模型 | 串联模型:S-W 模型 | 考虑到了植被冠层与土壤层的耦合关系 | 参数较多且多数无法基于遥感数据获取,实用性不高 |
| | | | 并联模型:平行模型 | 经验性得到简化;理论基础坚实;应用广泛 | 忽略了植被冠层与土壤层的耦合关系 |
| 经验统计模型法 Statistic methods | 基于遥感观测数据和地面实测数据,建立遥感反演参量与实测热通量的关系,通过建立二者之间的关系,估算区域潜热 | 简化法<br>基于植被指数的估算法基于差分热惯量的方法 | — | 在不具备气象观测数据的条件下,能在遥感数据的支持下逐像元反演蒸散发,克服机理模型气象参数模拟的不确定性,实用性较好 | 运用该方法的前提条件是大气状况稳定,存在极湿和极干区域,一定程度上限制了应用型,同时经验性交高,难以获取高精度信息 |
| 数值模拟模型法 Numerical model | 采用数值模拟的方法,基于土壤-植被-大气系统,模拟模型能量通量变化过程,包括地表生物、水文、热力过程,大气与地表能量交换过程和地下土壤水热输送及传导过程 | — | 水桶模型<br>SVATS 模型<br>考虑了植物生化过程的新型 SVATS 模型 | 目前由于 SVATS 模型在描述土壤-植被冠层蒸散发方面的优势,因而成为当前应用广泛、实现性高的模型 | SVATS 模型需要参数多,且参数很难通过遥感数据获取因而限制了在区域地表辐射平衡遥感研究中的应用 |

## 2.5 城市地表热岛的缓解研究

以城市绿地(公园绿地、街边绿化、防护绿地、生产绿地等)、森林和水体为主导的"冷岛效应"是当前改善城市热环境、削弱城市热岛效应最有效的手段。因而大量学者以城市公园植被、水体、人工森林等为研究对象探讨了冷岛效应在减缓热岛效应方面所发挥的作用[112]。例如贾宝全等[113]利用 2014 年的 Landsat-8 遥感数据对 2012—2014 年期间北京市实施"百万亩平原大造林工程"的降温效应进行了分析。结果表明北京市的造林工程对区域降温的效果显著,林地本身降温效果可达 1.023℃,并通过冷岛效应的辐射作用,扩展形成了 250212.88hm$^2$的降温面积,降温价值达 2.2622×10$^8$元。Onishi 等[114]基于 ASTER 遥感数据探讨了日本名古屋市不同季节的停车场绿化面积及城市的树木、草地、森林所带来的冷岛效应与地表温度之间的关系,研究发现不同季节的植被覆盖类型影响着城市地表温度的变化。冯悦怡等[115]和苏泳娴等[116]分别利用 TM 遥感数据探讨了北京市城区 24 个公园和广州市城区 17 个公园内部及其周边温度分布规律,并对城市公园与地表热环境效应之间的响应关系进行了探索。

## 2.6 城市地表热岛的尺度转换研究

一个城市的地表热环境易受到气候、纬度、海拔等条件的影响而呈现出多尺度现象,主要分为宏观、中观和微观尺度。其中,宏观尺度指的是研究区覆盖全城或较大的区域,范围一般大于 100km$^2$,中观尺度指的是城市内部的片区规模,范围在 0.5—100km$^2$,微观尺度指的是城市街区甚至是单体建筑物的规模。而尺度转换就是将不同分辨率的遥感数据信息扩展到其他尺度上,具体而言就是将高分辨率影像变成低分辨率影像称之为"尺度上推",反之则称之为"尺度下推"。目前尺度转换的方法有很多,从研究对象的角度上分,可以分

为基于像元尺度和面向对象尺度的转换[117]。例如,李慧宇[118]采用 TSM 模型对不同分辨率温度产品进行比对研究,研究表明经过尺度转换后二者的误差在 1K 左右,符合精度要求。Stathopoulou 等[119]运用 PBIM 法,将 NOAA AVHRR 的低分辨率数据降尺度到 120m,并与同样是 120m 空间分辨率的 TM 数据热红外波段反演的地表温度进行对比分析,研究结果表明降尺度后的 AVHRR 地表温度数据均方根误差从原来的 2.4℃降低到 0.94℃。

## 3 城市地表热环境研究方向

综合目前收集的文献来看,当前城市地表热环境研究在各个方面均有大量的研究成果已见报道,特别是 CFD 仿真技术与遥感技术相结合应用于城市规划和设计研究方面取得了较大进展[120-121],但距离高精度、定量化开展城市地表热环境遥感研究仍有一定的进步空间。针对目前存在的遥感数据源条件限制的问题,特别是当前缺乏星载高分辨率热红外遥感数据,无法实现城市街区、楼宇尺度温度定量观测问题,高时间分辨率数据往往空间分辨率低从而导致无法获得城市地物热环境特征问题,都需要进一步研究在多平台、多角度、多尺度数据综合应用下的城市地表热环境定量反演方法。尚未对城市地表热环境的时空格局变化规律有较为准确的认识,特别是遥感影像数据所获取的地表温度是一个时间断面数据,并不能准确反映一个城市在连续时间段内的空间变化特征,这需要从地表辐射平衡的角度出发,进一步应用遥感数据,深入分析不同时空尺度下的城市热环境演变规律。如何在对城市地表热环境进行准确评估和预测的基础上,有针对性地制定缓解城市热岛效应的技术与措施亦是今后研究难点之一。由于人为热数据获取十分艰难,因而当前已开展的城市地表辐射与能量平衡研究将人类活动造成的城市热环境影响基本忽略,但实际上人为热是城市地表辐射平衡研究中重要的一项,并对城市地表热平衡、显热、潜热通量以及净辐射变化有着深刻的影响,因此如何精确获取人为热数据,将其纳入到城市地表热环境研究尚需进一步探讨。

**参考文献(References):**


[1] 钱雨果. 城市精细景观格局对热环境的影响[D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2015.

[2] Oak T R. The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects// Cermak J E, Davenport A G, Plate E J, Viegas D X, eds. Wind Climate in Cities. Netherlands: Springer, 1995, 277: 81-107.

[3] 李祥余. 沿海湿润区和内陆干旱区城市热环境变化对比研究[D]. 北京: 中国科学院城市环境研究所, 2010.

[4] 王翠云, 王太春, 元炳成, 陈丽丽, 张慧. 城市热环境研究进展. 甘肃科技, 2009, 25(23): 91-94.

[5] Fan H L, Sailor D J. Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: a comparison of implementations in two PBL schemes. Atmospheric Environment, 2005, 39(1):73-84.

[6] Zhou X L, Wang Y C. Spatial—temporal dynamics of urban green space in response to rapid urbanization and greening policies. Landscape and Urban Planning, 2011, 100(3): 268-277.

[7] Voogt J A, Oke T R. Thermal remote sensing of urban climates. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(3): 370-384.

[8] Rizwan A M, Dennis L Y C, Liu C H. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. Journal of Environmental Science, 2008, 20(1): 120-128.

[9] 乔治, 田光进. 北京市热环境时空分异与区划. 遥感学报, 2014, 18(3): 715-734.

[10] Kovats R S, Hajat S. Heat stress and public health: a critical review. Annual Review of Public Health, 2008, 29(1): 41-55.

[11] White M A, Nemani R R, Thornton P E, Running S W. Satellite evidence of phenological differences between urbanized and rural areas of the eastern United States deciduous broadleaf forest. Ecosystems, 2002, 5(3): 260-273.

[12] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, Redman C L, Wu J G, Bai X M, Briggs J M. Global change and the ecology of cities. Science, 2008, 319(5864): 756-760.

[13] Akbari H, Pomerantz M, Taha H. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. Solar Energy, 2011, 70(3): 295-310.

[14] Ooka R. Recent development of assessment tools for urban climate and heat-island investigation especially based on experiences in Japan. International Journal of Climatology, 2007, 27(14): 1919-1930.

[15] Ziska L H, Bunce J A, Goins E W. Characterization of an urban-rural CO2 /temperature gradient and associated changes in initial plant

productivity during secondary succession. Oecologia, 2004, 139(3): 454-458.
[16] Poumadère M, Mays C, Le Mer S, Blong R. The 2003 heat wave in France: dangerous climate change here and now. Risk Analysis, 2005, 25(6): 1483-1494.
[17] Johnson H, Kovats R S, McGregor G, Stedman J, Gibbs M, Walton H. The impact of the 2003 heat wave on daily mortality in England and Wales and the use of rapid weekly mortality estimates. Euro Surveill, 2005, 10(7): 168-171.
[18] 薛志成. 城市热岛效应威胁人类健康. 安全与健康, 2002, (13): 15-16.
[19] 彭少麟, 周凯, 叶有华, 粟娟. 城市热岛效应研究进展. 生态环境学报, 2005, 14(4): 574-579.
[20] Konopacki S, Akbari H. Energy savings calculations for heat island reduction strategies in baton rouge, Sacramento and Salt Lake City. Report No. LBNL-42890, Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2000.
[21] Taha H, Hammer H, Akbari H. Meteorological and air quality impacts of increased urban albedo and vegetative cover in the greater Toronto area, Canada. Report No. LBNL-49210, Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2002.
[22] Takahashi K, Yoshida H, Tanaka Y, Aotake N, Wang F L. Measurement of thermal environment in Kyoto city and its prediction by CFD simulation. Energy and Buildings, 2004, 36(8): 771-779.
[23] Giridharan R, Ganesan S, Lau S S Y. Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong. Energy and Buildings, 2004, 36(6): 525-534.
[24] 中华人民共和国国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020 年). (2006-02-09) [2016-07-27]. http://www.gov.cn/jrzg/2006-02/09/content_183787.htm.
[25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 286-2013 城市居住热环境设计标准. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
[26] 中华人民共和国住房城乡建设部. 城市生态建设环境绩效评估导则(试行). 2015[2016-07-27]. http://www.zjjs.com.cn/n71/n72/c345411/part/3.pdf.
[27] Mohan M, Kandya A. Impact of urbanization and land-use/land-cover change on diurnal temperature range: a case study of tropical urban airshed of India using remote sensing data. Science of the Total Environment, 2015, 506-507: 453-465.
[28] Zheng B J, Myint S W, Fan C. Spatial configuration of anthropogenic land cover impacts on urban warming. Landscape and Urban Planning, 2014, 130: 104-111.
[29] Online US Environmental Protection Agency. [2016-07-27]. http://www.epa.gov/heatisland/about/index.htm.
[30] 但玻, 赵希锦, 但尚铭, 叶强. 成都城市热环境的空间特点及对策. 四川环境, 2011, 30(5): 124-127.
[31] 李海峰. 多源遥感数据支持的中等城市热环境研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
[32] 张金区. 珠江三角洲地区地表热环境的遥感探测及时空演化研究[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2006.
[33] Myrup L O. A numerical model of the urban heat island. Journal of Applied Meteorology, 1969, 8(6): 908-918.
[34] Oke T R, Johnson G T, Steyn D G, Watson I D. Simulation of surface urban heat islands under 'ideal' conditions at night Part 2: diagnosis of causation. Boundary-Layer Meteorology, 1991, 56(4): 339-358.
[35] Vukovich F M. A study of the atmospheric response due to a diurnal heating function characteristic of an urban complex. Monthly Weather Review, 1973, 101(6): 467-474.
[36] 吕世华, 陈玉春. 绿洲和沙漠下垫面状态对大气边界层特征影响的数值模拟. 中国沙漠, 1995,15(2): 116-123.
[37] 肖荣波, 欧阳志云, 张兆明, 王效科, 李伟峰, 郑华. 城市热岛效应监测方法研究进展. 气象, 2005, 31(11): 3-6.
[38] Stathopoulou M, Cartalis C, Keramitsoglou I. Mapping micro-urban heat islands using NOAA/AVHRR images and CORINE land cover: an application to coastal cities of Greece. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(12): 2301-2316.
[39] Streutker D R. A remote sensing study of the urban heat island of Houston, Texas. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(13): 2595-2608.
[40] Shao J T, Liu J, Zhao J N. Evaluation of various non-linear $k$—$\varepsilon$ models for predicting wind flow around an isolated high-rise building within the surface boundary layer. Building and Environment, 2012, 57: 145-155.
[41] Bo-ot L M, Wang Y H. Chiang C M, Lai C M. Effects of a green space layout on the outdoor thermal environment at the neighborhood level. Energies, 2012, 5(12): 3723-3735.
[42] 何萍, 陈辉, 李宏波, 席武俊. 云南高原楚雄市热岛效应因子的灰色分析. 地理科学进展, 2009, 28(1): 25-32.
[43] Swaid H, Hoffman M E. Prediction of urban air temperature variations using the analytical CTTC model. Energy and Buildings, 1990, 14(4): 313-324.
[44] Swaid H, Hoffman M E. Thermal effects of artificial heat sources and shaded ground areas in the urban canopy layer. Energy and Buildings, 1990-1991, 15(1/2): 253-261.
[45] 刘艳红, 郭晋平, 魏清顺. 基于 CFD 的城市绿地空间格局热环境效应分析. 生态学报, 2012, 32(6): 1951-1959.

[46] 陈云浩, 周纪, 宫阿都, 马伟, 占文凤. 城市空间热环境遥感——空间形态与热辐射方向性模拟. 北京: 科学出版社, 2014: 1-3.

[47] 谢启姣, 刘进华, 胡道华. 武汉城市扩张对热场时空演变的影响. 地理研究, 2016, 35(7): 1259-1272.

[48] Lv Z Q, Zhou Q G. Utility of Landsat image in the study of land cover and land surface temperature change. Procedia Environmental Sciences, 2011, 10: 1287-1292.

[49] 孟鹏, 胡勇, 巩彩兰, 李志乾, 栗琳, 周颖. 热红外遥感地表温度反演研究现状与发展趋势. 遥感信息, 2012, 27(6): 118-123, 132-132.

[50] Sobrino J A, Jiménez -Muñoz J C, Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. Remote Sensing of Environment, 2004, 90 (4): 434-440.

[51] Jiménez -Muñoz J C, Cristóbal J, Sobrino J A, Sòria G, Ninyerola M, Pons X. Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data. IEEE Transactions on Geoscience and remote Sensing, 2009, 47(1): 339-349.

[52] 覃志豪, Zhang M H, Karnieli A, Berliner P. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法. 地理学报, 2001, 56(4): 456-466.

[53] 甘甫平, 陈伟涛, 张绪教, 闫柏琨, 刘圣伟, 杨苏明. 热红外遥感反演陆地表面温度研究进展. 国土资源遥感, 2006, (1): 6-11.

[54] Wan Z M, Li Z L. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(4): 980-996.

[55] Gillespie A, Rokugawa S, Matsunaga T, Cothern J S, Hook S, Kahle A B. A temperature and emissivity separation algorithm for advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(4): 1113-1126.

[56] 覃志豪, Zhang M H, Karnieli A. 用 NOAA-AVHRR 热通道数据演算地表温度的劈窗算法. 国土资源遥感, 2001, (2): 33-42.

[57] 章皖秋, 袁华, 岳彩荣, 钮子鹏. 昆明中心城区地表温度反演及与土地覆盖关系分析. 西南林业大学学报, 2016, 36(5): 130-137.

[58] Rozenstein O, Qin Z H, Derimian Y, Karnieli A. Derivation of land surface temperature for Landsat- 8 TIRS using a split window algorithm. Sensors, 2014, 14(4): 5768-5780.

[59] 毛克彪, 唐华俊, 陈仲新, 邱玉宝, 覃志豪, 李满春. 一个从 ASTER 数据中反演地表温度的劈窗算法. 遥感信息, 2006, (5): 7-11.

[60] 朱贞榕, 程朋根, 桂新, 腾月, 童成卓. 地表温度反演的算法综述. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(5): 70-75.

[61] 孙铁钢, 肖荣波, 蔡云楠, 王耀武, 吴昌广. 城市热环境定量评价技术研究进展及发展趋势. 应用生态学报, 2016, 27(8): 2717-2728.

[62] Tomlinson C J, Chapman L, Thornes J E, Baker C. Remote sensing land surface temperature for meteorology and climatology: a review. Meteorological Applications, 2011, 18(3): 296-306.

[63] 陈爱莲, 孙然好, 陈利顶. 基于景观格局的城市热岛研究进展. 生态学报, 2012, 32(14): 4553-4565.

[64] 陈利顶, 孙然好, 刘海莲. 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展. 生态学报, 2013, 33(4): 1042-1050.

[65] Howard L. The climate of London: deduced from meteorological observations made in the metropolis and at various places around it. London: W. Phillips, Geogre Yard, 1818-1820, 1833.

[66] Rao P K. Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite. Bulletin of the American Meteorological Society, 1972, 53(7): 647-648.

[67] 葛荣凤, 王京丽, 张力小, 田光进, 冯悦怡. 北京市城市化进程中热环境响应. 生态学报, 2016, 36(19): 6040-6049.

[68] Sobrino J A, Oltra-CarriÓ R, Sòria G, Bianchi R, Paganini M. Impact of spatial resolution and satellite overpass time on evaluation of the surface urban heat island effects. Remote Sensing of Environment, 2012, 117: 50-56.

[69] Dousset B, Gourmelon F. Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperatures and landcover. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2003, 58(1/2): 43-54.

[70] 乔治, 田光进. 基于 MODIS 的 2001 年-2012 年北京热岛足迹及容量动态监测. 遥感学报, 2015, 19(3): 476-484.

[71] Zhou J, Chen Y H, Zhang X, Zhan W F. Modelling the diurnal variations of urban heat islands with multi-source satellite data. International Journal of Remote Sensing, 2013, 34(21): 7568-7588.

[72] Zakšek K, Oštir K. Downscaling land surface temperature for urban heat island diurnal cycle analysis. Remote Sensing of Environment, 2012, 117: 114-124.

[73] Yang J, Gong P, Zhou J X, Huang H B, Wang L. Detection of the urban heat island in Beijing using HJ-1B satellite imagery. Science China Earth Sciences, 2010, 53(S1): 67-73.

[74] 刘帅, 李琦, 朱亚杰. 基于 HJ-1B 的城市热岛季节变化研究——以北京市为例. 地理科学, 2014, 34(1): 84-88.

[75] 李元征, 尹科, 周宏轩, 王晓琳, 胡聃. 基于遥感监测的城市热岛研究进展. 地理科学进展, 2016, 35(9): 1062-1074.

[76] 田国良. 热红外遥感. 北京: 电子工业出版社, 2006.

[77] Small C. Comparative analysis of urban reflectance and surface temperature. Remote Sensing of Environment, 104(2): 168-189.

[78] Chen X L, Zhao H M, Li P X, Yin Z Y. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. Remote Sensing of Environment, 2006, 104(2): 133-146.

[79] 牟雪洁，赵昕奕. 珠三角地区地表温度与土地利用类型关系. 地理研究，2012，31(9)：1589-1597.
[80] Lazzarini M，Marpu P R，Ghedira H. Temperature-land cover interactions：the inversion of urban heat island phenomenon in desert city areas. Remote Sensing of Environment，2013，130：136-152.
[81] 彭文甫，周介铭，罗怀良，杨存建，赵景峰. 城市土地利用与地面热效应时空变化特征的关系——以成都市为例. 自然资源学报，2011，26(10)：1738-1749.
[82] Arnold C L Jr，Gibbons C J. Impervious surface coverage：the emergence of a key environmental indicator. Journal of the American Planning Association，1996，62(2)：243-258.
[83] Yang X J，Liu Z. Use of satellite-derived landscape imperviousness index to characterize urban spatial growth. Computers，Environment and Urban Systems，2005，29(5)：524-540.
[84] Weng Q H，Hu X F，Liu H. Estimating impervious surfaces using linear spectral mixture analysis with multitemporal ASTER images. International Journal of Remote Sensing，2009，30(18)：4807-4830.
[85] Yuan F，Bauer M E. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. Remote Sensing of Environment，2007，106(3)：375-386.
[86] 杨可明，周玉洁，齐建伟，王林伟，刘士文. 城市不透水面及地表温度的遥感估算. 国土资源遥感，2014，26(2)：134-139.
[87] Xiao R B，Ouyang Z Y，Zheng H，Li W F，Schienke E W，Wang X K. Spatial pattern of impervious surfaces and their impacts on land surface temperature in Beijing，China. Journal of Environmental Sciences，2007，19(2)：250-256.
[88] 孟宪磊. 不透水面、植被、水体与城市热岛关系的多尺度研究[D]. 上海：华东师范大学，2010.
[89] Gallo K P，Mcnab A L，Karl T R，Brown J F，Hood J J，Tarpley J D. The use of a vegetation index for assessment of the urban heat island effect. International Journal of Remote Sensing，1993，14(11)：2223-2230.
[90] 庞光辉，蒋明卓，洪再生. 沈阳市植被覆盖变化及其降温效应研究. 干旱区资源与环境，2016，30(1)：191-196.
[91] Raynolds M K，Comiso J C，Walke D A，Verbyla D. Relationship between satellite-derived land surface temperatures，arctic vegetation types，and NDVI. Remote Sensing of Environment，2008，112(4)：1884-1894.
[92] 龚珍，胡友健，黎华. 城市水体空间分布与地表温度之间的关系研究. 测绘通报，2015(12)：34-36.
[93] 徐涵秋. 基于城市地表参数变化的城市热岛效应分析. 生态学报，2011，31(14)：3890-3901.
[94] 张宇，陈龙乾，王雨辰，陈龙高，周天建，张婷. 基于 TM 影像的城市地表湿度对城市热岛效应的调控机理研究. 自然资源学报，2015，30(4)：629-640.
[95] O'Neil R V，Krummel J R，Gardner R H，Sugihara G，Jackson B，Deangelis D L，Milne B T，Turner M G，Zygmunt B，Christensen S W，Dale V H，Graham R L. Indices of landscape pattern. Landscape Ecology，1988，1(3)：153-162.
[96] Chen A L，Yao L，Sun R H，Chen L D. How many metrics are required to identify the effects of the landscape pattern on land surface temperature? Ecological Indicators，2014，45：424-433.
[97] Liu H，Weng Q H. Scaling effect on the relationship between landscape pattern and land surface temperature：a case study of Indianapolis，United States. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing，2009，75(3)：291-304.
[98] 陈辉，古琳，黎燕琼，慕长龙. 成都市城市森林格局与热岛效应的关系. 生态学报，2009，29(9)：4865-4874.
[99] Xu S L. An approach to analyzing the intensity of the daytime surface urban heat island effect at a local scale. Environmental Monitoring and Assessment，2009，151(1/4)：289-300.
[100] 陈利顶，傅伯杰，徐建英，巩杰. 基于"源-汇"生态过程的景观格局识别方法——景观空间负荷对比指数. 生态学报，2003，23(11)：2406-2413.
[101] 李丽光，许申来，王宏博，赵梓淇，蔡福，武晋雯，陈鹏狮，张玉书. 基于源汇指数的沈阳热岛效应. 应用生态学报，2013，24(12)：3446-3452.
[102] Mitchell B C，Chakraborty J. Urban heat and climate justice：a landscape of thermal inequity in Pinellas County，Florida. Geographical Review，2014，104(4)：459-480.
[103] 张瑜，黄曦涛，韩玲，谢露蓉，严荣华. 西安市城市热岛效应影响因子分析研究. 测绘通报，2015，(10)：47-51.
[104] Piao S L，Fang J Y，Zhou L M，Guo Q H，Henderson M，Ji W，Li Y，Tao S. Interannual variations of monthly and seasonal normalized difference vegetation index (NDVI) in China from 1982 to 1999. Journal of Geophysical Research，2003，108(D14)：4401.
[105] Hall A. The role of surface albedo feedback in climate. Journal of Climate，2004，17(7)：1550-1568.
[106] Santamouris M，Papanikolaou N，Livada I，Koronakis I，Georgakis C，Argiriou A，Assimakopoulos D N. On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. Solar Energy，2001，70(3)：201-216.
[107] Peng S S，Piao S L，Ciais P，Friedlingstein P，Ottle C，Bréon F M，Nan H J，Zhou L M，Myneni R B. Surface urban heat island across 419 global big cities. Environmental Science & Technology，2012，46(2)：696-703.

[108] 郑文武. 城市地表蒸散发遥感反演研究[D]. 长沙:中南大学, 2012.

[109] Eliasson I. Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use. Atmospheric Environment, 1996, 30(3): 379-392.

[110] Abutaleb K, Ngie A, Darwish A, Ahmed M, Arafat S, Ahmed F. Assessment of urban heat island using remotely sensed imagery over greater Cairo, Egypt. Advances in Remote Sensing, 2015, 4(1): 35-47.

[111] Mohan M, Kikegawa Y, Gurjar B R, Bhati S, Kolli N R. Assessment of urban heat island effect for different land use-land cover from micrometeorological measurements and remote sensing data for megacity Delhi. Theoretical and Applied Climatology, 2013, 112(3): 647-658.

[112] 余兆武, 郭青海, 孙然好. 基于景观尺度的城市冷岛效应研究综述. 应用生态学报, 2015, 26(2): 636-642.

[113] 贾宝全, 仇宽彪. 北京市平原百万亩大造林工程降温效应及其价值的遥感分析. 生态学报, 2017, 37(3): 726-735.

[114] Onishi A, Cao X, Ito T, Shi F, Imura H. Evaluating the potential for urban heat-island mitigation by greening parking lots. Urban Forestry & Urban Greening, 2010, 9(4): 323-332.

[115] 冯悦怡, 胡潭高, 张力小. 城市公园景观空间结构对其热环境效应的影响. 生态学报, 2014, 34(12): 3179-3187.

[116] 苏泳娴, 黄光庆, 陈修治, 陈水森. 广州市城区公园对周边环境的降温效应. 生态学报, 2010, 30(18): 4905-4918.

[117] 陈云浩, 冯通, 史培军, 王令飞. 基于面向对象和规则的遥感影像分类研究. 武汉大学学报: 信息科学版, 2006, 31(4): 316-320.

[118] 李慧宇. 遥感温度产品真实性验证及空间尺度转换研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.

[119] Stathopoulou M, Cartalis C. Downscaling AVHRR land surface temperatures for improved surface urban heat island intensity estimation. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(12): 2592-2605.

[120] 李鹍. 基于遥感与 CFD 仿真的城市热环境研究——以武汉市夏季为例[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.

[121] 王翠云. 基于遥感和 CFD 技术的城市热环境分析与模拟——以兰州市为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2008.





